

鋼アーチ橋の極限強度設計に関する研究

著者	矢吹 哲哉
号	556
発行年	1981
URL	http://hdl.handle.net/10097/11505

氏 名 矢 吹 哲 哉

授 与 学 位 工 学 博 士

学位授与年月日 昭和 56 年 5 月 13 日

学位授与の根拠法規 学位規則第 5 条第 2 項

最 終 学 歴 昭和 40 年 3 月

東北大学工業教員養成所土木工学科卒業

学 位 論 文 題 目 鋼アーチ橋の極限強度設計に関する研究

論 文 審 査 委 員 東北大学教授 倉西 茂 東北大学教授 佐武 正雄

東北大学教授 尾坂 芳夫 東北大学助教授 三浦 尚

論 文 内 容 要 旨

1. 研究の目的

本論文の研究目的は、鉛直及び側方荷重を受ける鋼アーチ橋の変形挙動、応力性状及び極限強度特性を研究し、そこで得た知見に基づいて合理的な強度設計法を提案することにある。

橋梁は一般に橋の自重及び車輛等による主荷重としての鉛直荷重と風及び地震等で代表される側方荷重を受ける。特に、アーチ橋は空間に突出した細長い曲線部材に高圧縮軸方向力が作用する構造物であるので、この側方荷重による面外挙動が極限強度に及ぼす影響にも配慮が払われる必要があるものと思われる。しかも、近年高張力鋼の普及等によりアーチ橋は増々長径間化の傾向にあることから、この問題の解明が急がれて来ている。しかしながら、現在までのところ、側方荷重の影響をも考慮したアーチ橋の極限強度特性に関しては研究例が少なく、その性質はまだ充分には明らかにされていない。

このような現状を踏まえて、本論文では、鉛直荷重及び風や地震で代表されるような側方荷重を受ける鋼アーチ橋の極限強度及び極限状態に至るまでの変形・応力挙動に及ぼすライズスパン比、荷重形状、主構剛性及び横構剛性の影響等についての検討がなされ、それらの基本的な特性が明らかにされている。さらに、そこで得られた研究結果を強度設計の観点から再検討し、側方荷重の影響も考慮して極限強度に基づいた強度照査式の導出がなされている。又、強度のみならず、橋の強度を保つのに必要な剛度についても検討を行い、よりバランスのとれた鋼アーチ橋

の強度設計法を目指したものが提案されている。本論文で提案されている強度設計法では、“一般に、実用に供用するための橋梁の強度は鉛直荷重（主荷重）に対する鉛直荷重作用面内での強度をもって定義されるべきである”とする橋梁構造物の基本的な強度設計の考え方が貫かれている。

提案された強度設計法の内容の主なものは、アーチ主桁の面内極限強度及び風や地震等で代表される実橋が受ける程度の側方荷重が面内極限強度に及ばず影響の実用的な照査法、さらに、極限状態に至るまでの強度を保つのに必要なアーチ主桁の構成鋼材の極限歪、横構斜材と横梁材の必要剛度及びアーチ橋を平面構造系として取り扱うことを可能とするようなアーチ主構全体を一体断面として得られる面外必要剛度の実用的な算定法等である。

2. 研究の内容の概要

本論文では、まず、鋼アーチ橋の基本的な構造特性を把握するために線形理論による面内及び面外解析を行い、主として、面内応力特性及びアーチ橋の面外変形挙動に対するアーチ主桁自身の持つ側方曲げ剛性、ねじり剛性及び横構剛性の協力作用効果についての検討が行われている。そして、そこで得た知見等に基づいて以下に示すようなパラメーターが選択され、鋼アーチ橋の極限強度に関する研究がなされている。

$$f/L = 0.1 \sim 0.3 \text{ (0.15)}, \quad \lambda_{IN} = 100 \sim 300 \text{ (200)}$$

$$S = 0 \sim 0.99 \text{ (0.75)}, \quad \lambda_{OUT} = 10 \sim 40 \text{ (20)}$$

$$\mu_s = 1/1.5 \sim 1/150 \text{ (1/15)}, \quad \mu_T = 0 \sim 50 \text{ (10)}$$

尚、（ ）内の値は鋼アーチ実橋の平均値を示している。ここで、 f/L はライズスパン比、 λ_{IN} はアーチ主桁の面内細長比、 S は鉛直荷重形状の非対称性を表わす荷重形状係数で、本論文では、アーチの面内初期不整を考慮して、鉛直荷重形状を常に1%非対称化している。又、 λ_{OUT} はアーチ主構全体を一体断面として得られる面外細長比である。 μ_s は $(L_s/b)^2 \cdot GA_{b,eq}/24EA_a$ （ L_s =アーチ軸線長、 b =アーチ主桁間隔長、 $GA_{b,eq}$ =斜材により発揮される剪断剛性、 EA_a =アーチ主桁伸縮剛性）で、斜材と等価な剛性を持つ腹板の剪断剛度とアーチ主構一体としての面外剛度との比で表わした斜材剛性に関する無次元パラメーターである。 μ_T は $L^2/bc \cdot EI_b/GI_T$ （ c =横梁材取り付け間隔長、 L =アーチ支間長、 EI_b =横梁材曲げ剛性、 GI_T =アーチ主桁のねじり剛性）で、横梁材剛性の協力作用によるアーチ主構一体断面としてのSway変形に対する剛度を表わしている。

本論文では、従来実用上適切と思われる解析方法はまだ充分に開発されていなかった3次元非線形挙動をも含む一般的な骨組構造物の極限強度数値解析法の導出がなされている。本解析法では、変形、鋼材の塑性化及び塑性域の部材断面内と部材軸方向への拡がり、歪反転による除荷等の影響が3次元で考慮されている。本解析法は、構造物中のある部材断面応力が降伏領域の極近傍にあるような応力状態であっても歪径路がなめらかであれば従来の方法のように荷重増分量を極端に小さくすることなく応力-歪増分関係を評価出来るように、工夫されている。構造解析法

及び非線形挙動の数値解析法は一般に用いられている有限要素法及びNewton-Raphson法を併用した修正荷重増分法が用いられている。本解析法については、既に発表されている鋼アーチの極限強度に関する実験結果を例にとりての比較(図-4・2)、さらに、一種の連続的解法である積分法との比較等によって解の精度の検証がなされている。

鋼アーチ橋の極限強度特性については、本論文では先ず、鉛直荷重を受ける場合の面内極限強度について詳細な数値パラメトリック解析を行い、その強度特性及び極限状態に至るまでの挙動が検討されている。ライズースパン比、細長比、鉛直荷重形状、残留応力、断面形状、断面寸法、集中荷重、鋼材の降伏点応力度等の影響についての検討結果の中から、いくつかの事項を抜粋して試みることとする。標準的な鋼アーチ橋を対象にして、極限状態に至るまでの作用荷重とアーチ主桁1/4点での鉛直変位の関係が図-4・4に示されている。図中、実線は有限変形、鋼材の塑性化及び塑性域の拡がり等による非線形挙動を考慮することにより

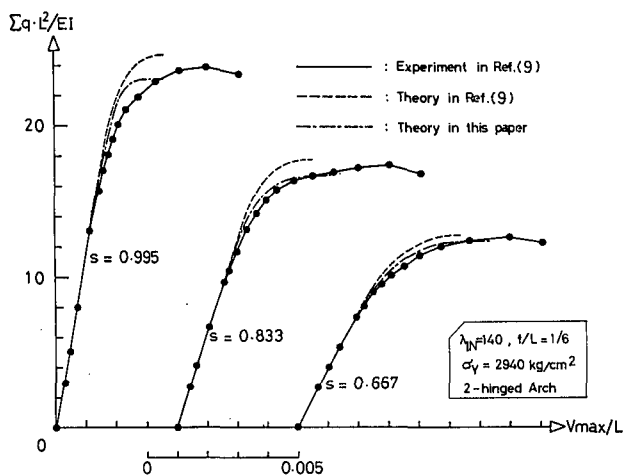


図4.2 A comparison between experimental results and theoretical ones

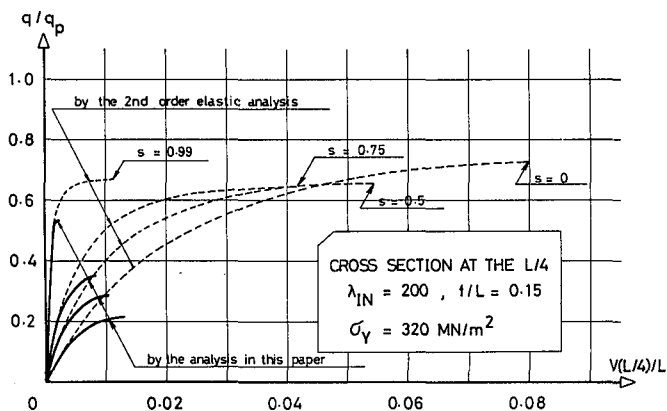


図4.4 Load - deflection curve at the quarter pt. of arch rib

より解析されるいわゆる極限状態に至るまでの変形挙動を示している。他方、点線は、有限変形の影響のみを考慮し、鋼材は降伏しないとするいわゆる弾性安定限界状態に至る結果を示している。これらの解析結果より、弾性安定限界荷重強度は極限荷重強度をかなり上まわること、そしてこの傾向は軸力に比較して曲げモーメントが卓越する荷重状態となるに従い顕著となること等が明らかにされている。図-4・9及び4・10には、アーチ主桁の面内細長比 λ_{IN} 、ライズースパン比 f/L 及び鉛直荷重の非対称性を表わす荷重形状係数 S が鋼アーチ橋の面内極限強度に与える影響について解析的に検討した結果の一部が示されている。これらの解析結果より、細長比 λ_{IN} が増加するに従い、又荷重形状係数 S が小さくなるに従い極限強度の減少が顕著となること

及びライズスパン比の影響は定量的に見ればさほど大きくはないこと等の結論が導出されている。

鋼アーチ橋の極限強度について、さらに本論文では、側方荷重の影響についての検討がなされている。この検討は、主に、実橋が受ける程度の側方荷重が鋼アーチ橋の面外崩壊の誘発要因とはならずこの橋構造物は平面構造物として取り扱い得るとするためにはどの程度の面外剛度を確保してやればよいかという問題を解明するために、なされている。解析は図-5・1に示されているような鉛直及び側方荷重を受ける鋼アーチ橋を対象としてなされている。本論文では、この問題に関して先ず、鉛直荷重と側方荷重の載荷径路が極限強度に及ぼす影響についての検討がなされた。(図-5・5) その結果、第1載荷段階として側方荷重を載荷し、次に第2載荷段階として鉛直荷重を崩壊に至るまで漸増載荷することにより実用上充分合理的に側方荷重の影響を考慮することが出来ることが示された。この結果に基づいて、本論文では以後この荷重径路が採用されている。

次に本論文では、横構の剛性不足が原因で鋼アーチ橋の面外崩壊が起

こるようなことはないとするために必要な横構剛性の検討がなされている。その結果の一部として、図-5・8、5・12及び5・14が拮粹されている。図-5・8には、一般的な構造諸元を有する鋼アーチ橋を対象にして、横構斜材剛性のみを変化させた場合の荷重-変位曲線の代表的な例がプロットされている。図より、鋼アーチ実橋で一般的に使用されている範囲か又はそれ以上の剛性 ($\mu_s \geq 1/15$) を持つ斜材で補剛されている鋼アーチ橋の変形はほぼ鉛直荷重を含む面内でのみ増加し、崩壊形式は面内のそれを示していることが分る。図-5・12及び5・14は μ_s

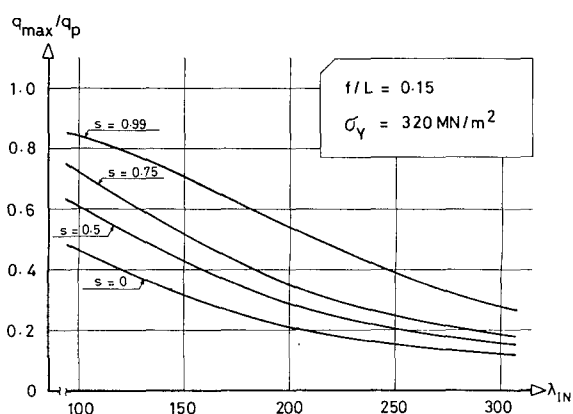


図4.9 Relationship between maximum load intensity and slenderness ratio

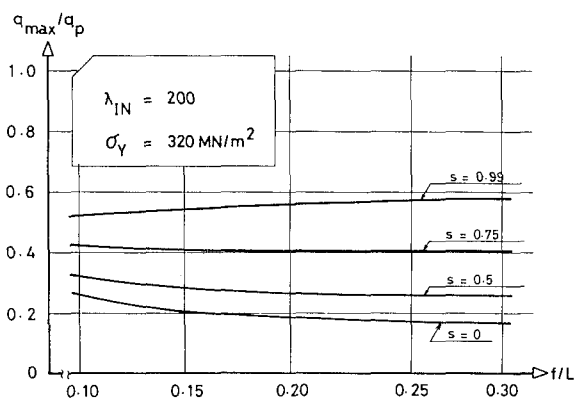


図4.10 Relationship between maximum load intensity and rise-to-span ratio

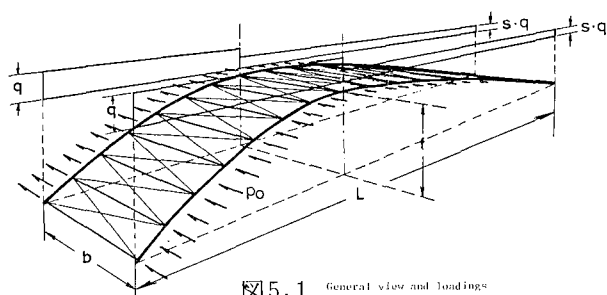
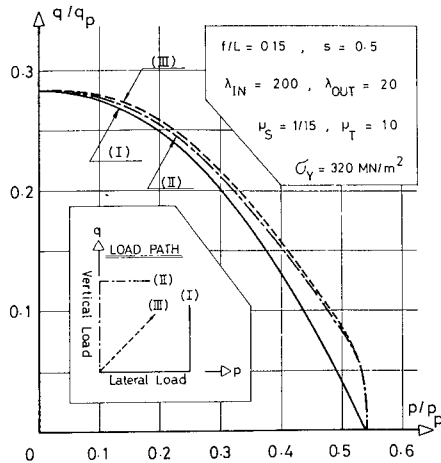
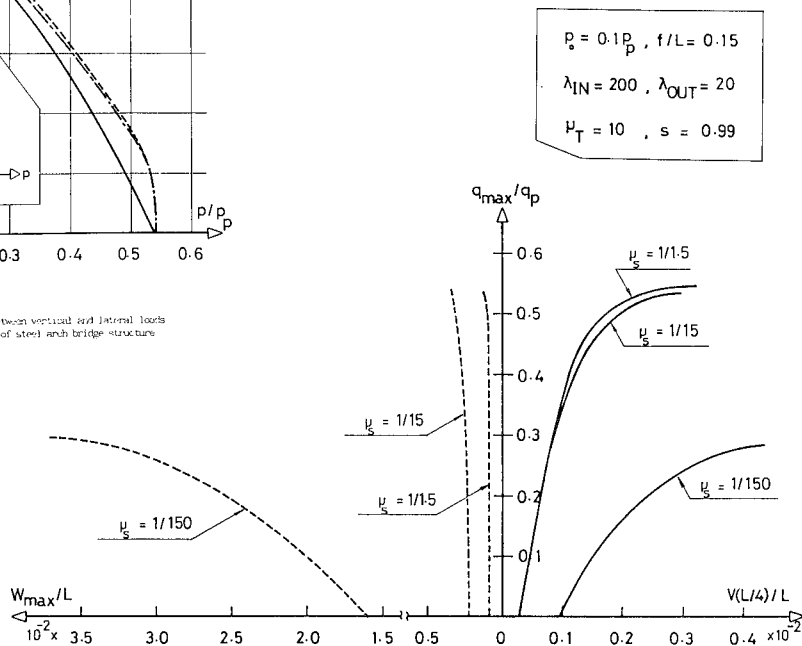


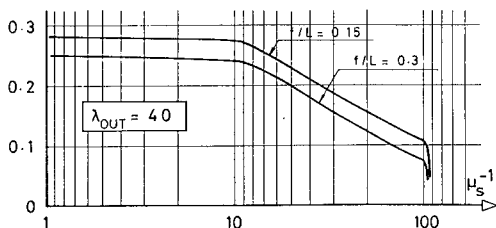
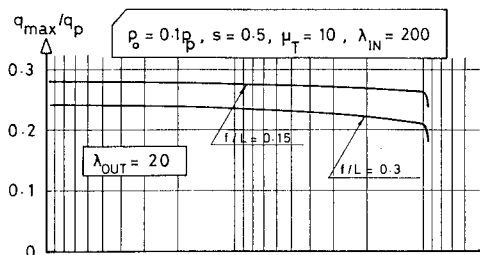
図5.1 General view and loadings



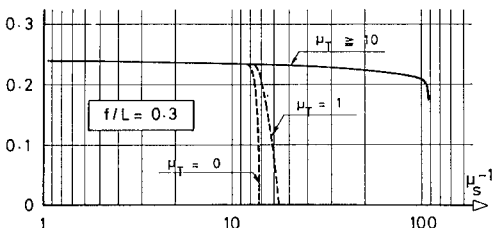
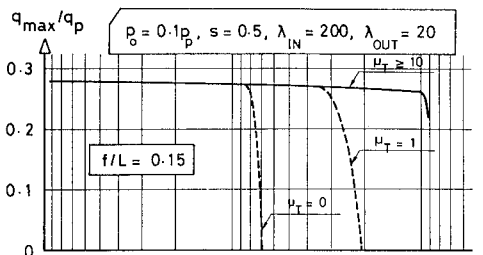
5.5 Effect of loading path between vertical and lateral loads on the ultimate strength of steel arch bridge structure



5.8 Load - deflection curves at the quarter pt. of arch rib for vertical deflection and at the crown for lateral one ($s = 0.99$)



5.12 Effect of lateral bracing rigidity and out-of-plane slenderness ratio on the maximum load intensity ($s = 0.5$)



5.14 Effect of lateral bracing rigidity and cross beam rigidity on the maximum load intensity

パラメーターで評価された斜材剛性及び μ_T パラメーターで評価された横梁材剛性が極限強度に及ぼす影響についてなされた検討結果の一部が示されている。これらの検討結果より、少なくとも横構の剛性の不足が原因で鋼アーチ橋が面外崩壊するようなことはないとするための必要剛度の実用照査式が次式の如くに提示された。

$$\begin{aligned} \text{斜材に対して} &: \frac{GA_{b,eq}}{24EA_a} \cdot \left(\frac{L_s}{b}\right)^2 \geq \frac{1}{15} \\ \text{横梁材に対して} &: \frac{EI_b}{GI_T} \cdot \frac{L^2}{bC} \geq 10 \end{aligned} \quad \text{①}$$

さらに、鉛直荷重及び道路橋示方書で規定されている程度の側方荷重を受ける鋼アーチ橋を平面構造物として強度評価することを実用上可能とする橋一体断面としての面外必要剛度の検討がなされている。検討結果の一部として、ここでは、図-5・18、5・19及び5・20を抜粋することとする。図-5・18には、この側方荷重による極限強度への低減率を表わす影響係数 Φ と橋一体断面としての面外細長比 λ_{OUT} との関係をアーチ主桁の面内細長比 λ_{IN} を変化させて検討した結果の一例が示されている。ここに、影響係数 Φ は次式で算定されるものである。

$$\Phi = \frac{\text{鉛直及び側方荷重を受ける場合の極限強度}}{\text{鉛直荷重のみを受ける場合の極限強度}}$$

図より、橋の死荷重が活荷重に比較してかなり大きくなるような、又、両主桁間隔とアーチ支間長の比が小さくなるような長径間のアーチ橋の場合には、橋全体を一体断面として算定される面外細長比の増加に伴い、側方荷重による極限強度の低減率は指数関数的に増加することが分かる。図-5・19には、側方荷重によりアーチクラウン部に生ずる初期側方変位 W_0 とライズースパン比 f/L の関係を、アーチ主桁の面内細長比 λ_{IN} を変化させて検討した結果が示されている。本論文

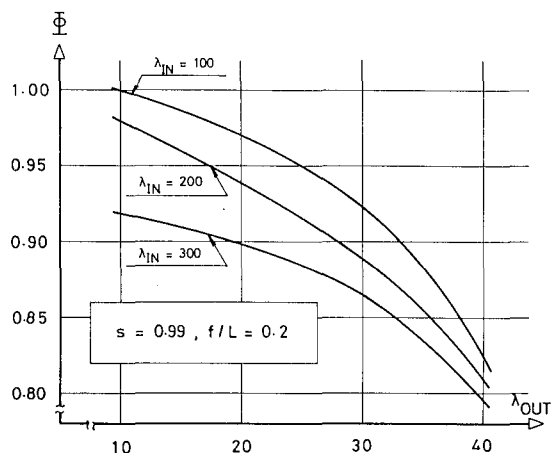


図5.18 Effect of out-of-plane and inplane slenderness ratios on the influence factor of the ultimate load ($s = 0.99$)

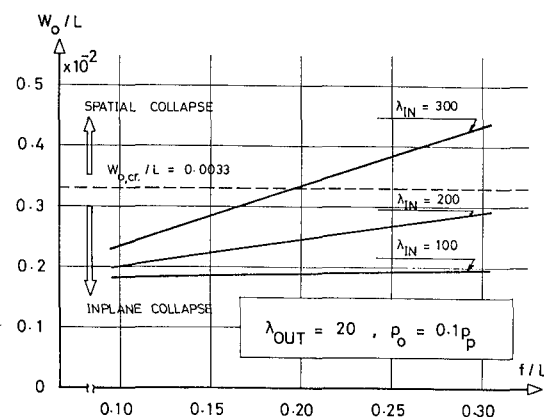


図5.19 Initial deflection in lateral direction vs. rise-to-span ratio

中では、この W_0 の数多くの解析結果を回帰分析による統計処理を行い、 W_0 の 実用簡易算定式の導出がなされている。結果のみ示せば、次式ようになる。

$$\frac{W_0}{L} = \frac{P_0}{P_p} \cdot \frac{(\lambda_{IN} - 100)(44.2 f/L + 7.84) + 9.05(300 - \lambda_{IN})}{2 \times 10^6} \quad \text{②}$$

さらに本論文では、これまでに行った立体構造物としての極限強度解析結果を全て集合して、崩壊形式の別に初期側方変位 W_0 で評価した橋自身の持つ面外剛度と側方荷重による極限強度への影響係数 Φ との関係の検討がなされた。その結果が図-5・20にまとめられている。図より、鉛直及び示方書規定程度

の側方荷重を受ける鋼アーチ橋が平面構造物として取り扱い得るするためには、少なくとも図中の斜線を施した範囲内に Φ 及び W_0/L が存在するような面外剛度を有している必要があることが分った。この $\Phi-W_0$ 関係とこれまでの検討で導出された W_0 の実用簡易算

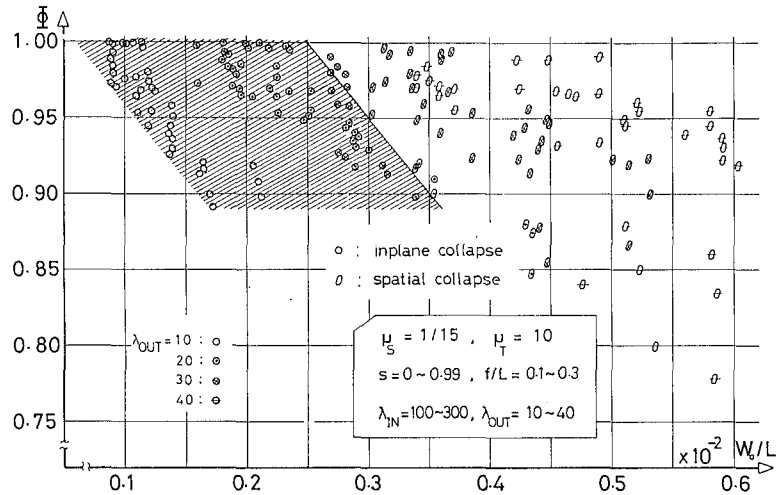


図5.20 Calculated result range of the influence factor of the ultimate strength and the initial lateral displacement at the crown of arch rib

定式により、鋼アーチ橋の面外必要剛度の実用算定式として、次式が提案された。

$$\lambda_{OUT} \leq \frac{P_p}{P_0} \cdot \frac{14}{(\lambda_{IN} - 100)(0.442 f/L + 0.0784) + 0.0905(300 - \lambda_{IN}) - 1.905 P_p/P_0} \quad \text{③}$$

さらに本論文では、これらの剛度についての実用算定式により確保された面外剛度を有する鋼アーチ橋は、平面構造物として極限強度を評価することが可能であることが、検証されている。

以上得られた結果より、鋼アーチ橋の極限強度は、断面力又は応力度で表わした面内極限強度側方荷重による低減率を乗じることにより、実用上合理的な照査がなされることになる。この側方荷重の影響は、側方荷重による面内極限強度の低減率を表わす影響係数 Φ で評価されている。

図-5・20での検討結果より、次式に示すような実用算定式が提案された。

$$\Phi = 0.97 + \frac{\lambda_{OUT}}{105} - \frac{W_0}{L} \times 10^2$$

但し、 λ_{OUT} は③式を満足していなければならない。

又、上式中の W_0/L は②式を用いて算定すればよい。本論文では、慣用設計式の導出の観点から、1次解析による断面力又は応力度を用いて強度照査出来る設計式の導出がなされている。その導出手順の概略を以下に示す。面内極限荷重を受けるアーチについて1次解析で算定したアーチ主桁の1/4点での軸力 N_{\max}^{1st} と曲げモーメント M_{\max}^{1st} の相関々係を求める。その一例として、図-

6・2が抜粋されている。アーチ主桁の面内細長比、ライズースパン比、降伏点応力度及び鉛直荷重形状の変化に対応した N_{\max}^{1st} - M_{\max}^{1st} の相関曲線を数式表現するために、これまで解析した全ての面内極限強度に対してこの相関々係が求め

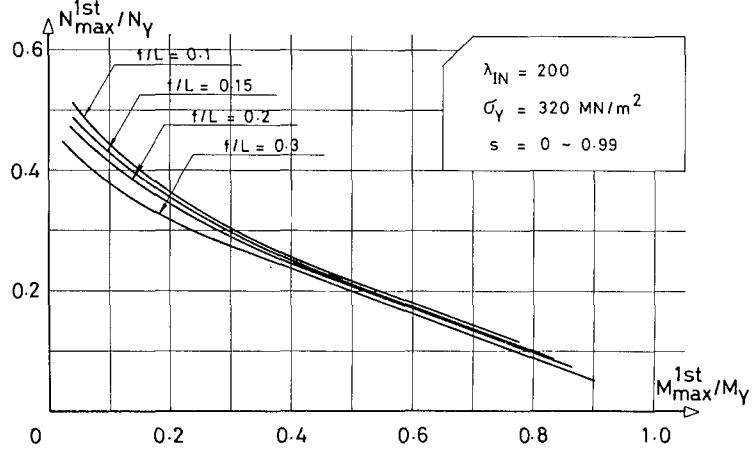


図6.2

Relationship between thrust and bending moment calculated by the 1st order analysis under the ultimate load ($\lambda_{IN} = 200$)

る。次に、これらの相関曲線を実用的に評価し得る相関式の提案がなされ、この相関式に上記の N_{\max}^{1st} 及び M_{\max}^{1st} を代入して、構造パラメーターの変化に対応した相関式の係数群の算定がなされる。このようにして得られた係数群について、細長比、ライズースパン比及び降伏点応力度で回帰分析による統計処理を行い、係数群が定められる。以上の手順により、鋼アーチ橋の面内極限強度に関する設計照査式が次式のように導出された。

$$\begin{aligned} \frac{N_{\max}^{1st}}{N_Y} > \eta_{CR} &: \frac{N_{\max}^{1st}}{N_Y} + \left(\nu_1 \frac{M_{\max}^{1st}}{M_Y} \right)^2 = \nu_2 \\ \frac{N_{\max}^{1st}}{N_Y} \leq \eta_{CR} &: \frac{N_{\max}^{1st}}{N_Y} + \bar{\nu}_1 \frac{M_{\max}^{1st}}{M_Y} = \bar{\nu}_2 \end{aligned} \quad \text{⑤}$$

ここに、各係数は次式で与えられる。

$$\eta_{CR} = 0.32 - \bar{\lambda}^2/80, \quad \bar{\lambda} = 1/\pi \cdot \sqrt{\sigma_Y/E} \cdot \lambda_{IN}$$

$$\nu_1 = \bar{\lambda} \cdot \frac{B_0 - B_1 N_{\max}^{1st}/N_Y + B_2 (N_{\max}^{1st}/N_Y)^2}{1 - N_{\max}^{1st}/N_Y}$$

$$B_i = (b_{i0} + b_{i1} \bar{\lambda} + b_{i2} \bar{\lambda}^2)^2, \quad b_{ij}: \text{表-6・1}$$

$$\nu_2 = K \{ 1.46 - 0.43 \bar{\lambda} + 0.03 \bar{\lambda}^2 - (2.45 - 1.26 \bar{\lambda} + 0.19 \bar{\lambda}^2) f/L \}$$

$$K = 1.18 - 0.81 \sqrt{E/\sigma_Y} / 10^2, \quad \bar{\nu}_1 = \eta_{CR} / (\bar{M}_0 - \bar{M}_n)$$

$$\bar{\nu}_2 = 0.98 \bar{\nu}_1 \bar{M}_0, \quad \bar{M}_n = \sqrt{\nu_2 - \eta_{CR}} / \nu_1 (\eta_{CR})$$

$$\bar{M}_0 = 1.28 - 0.08 \bar{\lambda} - (0.56 - 0.20 \bar{\lambda}) f/L$$

本論文中には、アーチ主桁の面内細長比、ライズスパン比、鉛直荷重の形状係数、集中荷重及び降状点応力度等を変化させて上記強度照査式の精度が検討されている。検討結果の一例として、図-6・5を抜粋する。これらの検証により、本提案式の実用性が確かめられた。

3. 本論文の構成

本論文は全部で7章から成っている。その構成は次の通りである。

第1章 序論

第2章 鋼アーチ橋の基本的な構造特性

第3章 立体骨組構造物の極限強度解析法

第4章 鋼アーチ橋の面内極限強度特性

第5章 鋼アーチ橋の極限強度に及ぼす側方荷重の影響

第6章 極限強度設計法

第7章 総括及び結論

表-6・1 $\alpha \cdot \beta$ の値

b_{ij}	$f/L \leq 0.2$		$f/L > 0.2$	
	α	β	α	β
b_{00}	-2.02	1.63	1.06	1.44
b_{01}	2.94	-0.98	0.90	-0.57
b_{02}	-0.86	0.23	-0.17	0.10
b_{10}	-5.94	2.77	-4.31	2.45
b_{11}	12.3	-3.25	4.77	-1.74
b_{12}	-3.70	1.01	-0.91	0.45
b_{20}	14.6	4.29	-6.63	2.67
b_{21}	24.8	-6.06	7.06	-2.52
b_{22}	-6.87	2.01	-1.11	0.85
備 考	$b_{ij} = \alpha (f/L) + \beta$			

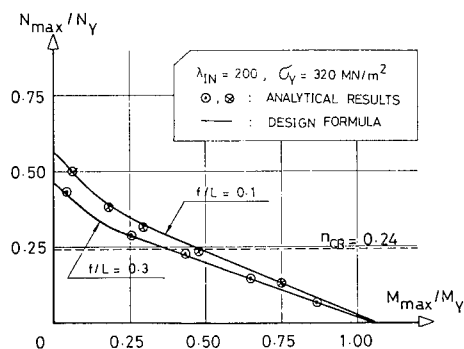


図6.5 Comparison of design formula with analytical results. ($\lambda_{1N} = 200$)

謝 辞

参考文献

〔付録-I〕 面外弾性1次解析法の補遺

〔付録-II〕 3次元非線形構造解析法の補遺

審 査 結 果 の 要 旨

アーチ橋の主構造は空間に突出し、細長く湾曲しており、しかも高圧縮軸力を受ける。近年発達しつつある極限強度設計法の考え方に基づいて、立体構造物としてのアーチ橋を設計するためには、主荷重に対する面内極限強度照査のみならず、従荷重である側方荷重などの影響の導入も必要である。

本論文は、極限強度に基づいた、鉛直および側方荷重を受ける鋼アーチ橋の設計法の提案を目的として行った研究の成果をまとめたもので、全編7章よりなる。

第1章は序論であり、従来の研究を概括し、本研究の目的および概要を述べている。

第2章では、鋼アーチ橋の面内と面外挙動についてそれぞれ弾性1次解析を行い、アーチの基本的な構造特性に関する資料を提供している。

第3章では、有限変形、材料の塑性化、塑性域の拡がりおよび応力除荷の影響を考慮し、高精度でかつ収斂性のよい立体的極限強度の数値解析法を新たに導出している。

第4章では、先ず前述の極限強度解析法の妥当性を、実験結果と比較して、確認している。次に、この解析法を用いて鉛直荷重を受ける鋼アーチの面内極限強度を詳細に検討し、その特性を明らかにしている。これらは、アーチの強度照査式を導出するための基礎となる重要な成果である。

第5章では、鉛直および側方荷重を受ける鋼アーチ橋の極限強度を求めると共に、横構剛度および主構面外剛度がこの極限強度特性に及ぼす影響を解明している。これらは、側方荷重の影響を把握するための極めて有用な概念と評価法を提供したものである。

第6章では、現在用いられている橋梁の設計法に本解析結果を反映させる方法を案出し、アーチの極限強度に基づいた設計式の提案を行っている。さらに、アーチ構造の立体的強度を保つのに必要な剛度の実用算定式を導出し、均整のとれた強度と剛度を有する鋼アーチ橋の設計法を提案している。以上は、従来の設計法に極限強度の概念を導入することに成功した極めて優れた成果である。

第7章は結論である。

以上要するに、本論文は鉛直および側方荷重を受ける鋼アーチ橋の応力、変形および極限強度特性を詳細に検討すると共に、その結果に基づいて極限強度設計法を提案したもので、その成果は土木工学、橋梁工学の進展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。